

反射型磁光多层膜隔离器的频率响应 及宽容性研究^{*}

李国俊¹⁾ 康学亮¹⁾ 李永平^{1,2)†} 吕 超³⁾ 范正修³⁾ 丁 磊⁴⁾ 隋 展⁴⁾

1) 中国科学技术大学物理系,合肥 230026)

2) 中国科学院量子信息重点实验室,合肥 230026)

3) 中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

4) 中国工程物理研究院第八研究所,绵阳 621900)

(2006 年 5 月 30 日收到,2006 年 8 月 25 日收到修改稿)

通过传输矩阵法分析了材料介电常数的变化对于单缺陷结构的磁光多层膜隔离器性能的影响,并提出了一种多缺陷结构的磁光多层膜结构.同单缺陷结构相比,多缺陷结构的旋转角的频谱响应带宽有很大增加,对于材料介电常数变化的宽容性得到了一个数量级的提高.同时这种多缺陷的结构对于膜层厚度的变化和入射角度也有很好的宽容性.

关键词:光隔离器,磁光效应,一维光子晶体

PACC: 7820L, 3345, 4210Q, 4283Q

1. 引言

磁光多层膜由于可以通过光的局域化来实现增强的磁光效应,近年来受到了人们的重视并对其进行越来越深入的研究.从开始的准周期结构^[1-3]到单缺陷的“三明治”结构^[4,5],再到后来的多缺陷结构^[6-11],磁光多层膜的性能逐渐提高.其中,反射型的磁光多层膜^[5,8]与透射型相比,具有膜层数量少,旋光角度大,能量反射率高等优势,在磁光隔离器、光通讯等方面有很好的应用前景.然而,以往的研究主要集中于多层膜结构的优化设计上,而且都是针对正入射并且各种参数完全没有误差的理想情况,对于实际的制备和使用中入射光的角度和参数的误差对器件性能带来的影响则几乎没有涉及.

在之前的工作中^[12],我们讨论了一种反射型的单缺陷结构 $[G_2G_1]^\dagger M [G_1G_2]^\dagger$,其中 G_1 代表 SiO_2 , G_2 代表 Ta_2O_5 ,在 $1.053 \mu\text{m}$ 处它们的介电常数分别为 $\epsilon_{G_1} = 2.102$, $\epsilon_{G_2} = 4.73$; M 为各向异性的磁光介质 Bi:YIG ,在 $1.053 \mu\text{m}$ 处, $\epsilon_1 = 5.87$, $\epsilon_2 = 0.0028$. 我们取 $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = \epsilon_1$, $\epsilon_{xy} = -\epsilon_{yx} =$

$i\epsilon_2$). 上角标的数字代表此单元重复的周期数目.这种结构与普通单缺陷结构的不同之处在于磁光介质层较厚,达到 10 个波长^[12],通过用传输矩阵法^[5,10]进行模拟,我们发现这种结构的旋转角频谱响应带宽有所增大,对于膜层厚度的变化和入射角度的变化有较好宽容性^[12].但是在实际的制备过程中,膜层的介电常数,或者说折射率不会与设计所依据的数值完全相同.制备过程中的沉积温度、压强、沉积速率等都会对薄膜的介电常数造成影响^[13-15],加上测量的误差,薄膜介电常数的实际值和设计值相比也会有误差.所以讨论膜层的介电常数的变化对于器件性能的影响,并且反馈回实际的结构设计中是很有意义的.

2. 介电常数的误差对于单缺陷磁光多层膜性能的影响

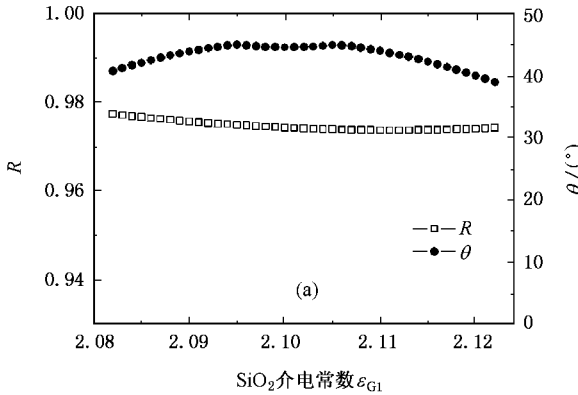
2.1. 介电常数的误差对于单缺陷磁光多层膜性能的影响

为叙述方便我们把上面提到的结构称为构型

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10376036)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: liyp@ustc.edu.cn

1 其设计旋转角为 44.61° ,反射率为 97.41% .下面用这种结构通过传输矩阵法来讨论介质介电常数的误差对于单缺陷反射型隔离器性能的影响.图 1(a)是 SiO_2 的介电常数的变化对于反射率和旋转角的影响.设计时 SiO_2 介电常数的参考值为 $\epsilon_{\text{G1}} = 2.102$,在膜层厚度不变的情况下,考虑 ϵ_{G1} 有 0.02 的变化.从图中可以看出这种变化对于反射率的影响很小,对旋转角的影响稍大.另外一种材料 Ti_2O_5 ,通过计算,如果考虑介电常数同样范围的变化,其影响更



小.图 1(b)为磁光材料层 $\text{Bi}:\text{YIG}$ 的介电张量对角元 ϵ_1 的影响,其设计参考值为 5.87 ,同样考虑 0.02 的变化.可以看出,这种变化对于旋转角的影响非常大,仅在中心很小的范围内基本符合设计性能,当 ϵ_1 与设计参考值的误差为 0.02 时,旋转角已经降到 5° 左右,但是对于反射率的影响仍不太大,大约只有 2% 左右. $\text{Bi}:\text{YIG}$ 的介电张量非对角元 ϵ_2 对于旋转角和反射率的影响很小,而且基本为线性,由于影响很小,这里没有用图表示.

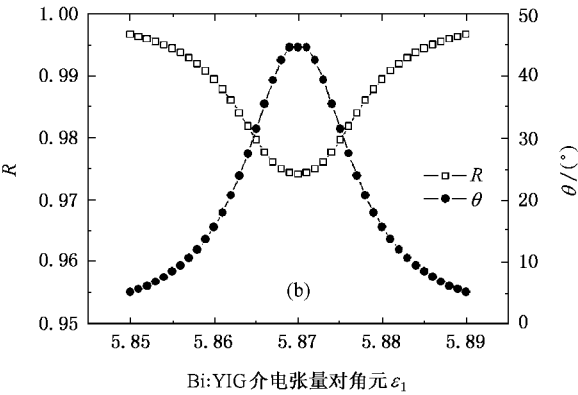


图 1 材料介电常数的变化对于器件的反射率和旋转角的影响 (a)为 SiO_2 介电常数的影响 (b)为 $\text{Bi}:\text{YIG}$ 的介电张量对角元的影响

从上面的结果可以看出,对于构型 1 来说,普通介质和磁光介质的介电常数误差对理论反射率的影响都很小,但是对于旋转角的影响较大.特别是磁光介质,其介电张量对角元 ϵ_1 的误差对旋转角的影响非常大.这说明在设计和制备多层膜结构时,保证磁光介质介电张量对角元 ϵ_1 的准确性对于保持器件性能是至关重要的.但是如图 1(b)所示,要保证旋转角在 45° 附近, ϵ_1 的误差不能大于 0.002 .就像在前面提到的,影响薄膜介电常数的因素有很多,要达到这样的精度对于实验制备来说是很困难的.

2.2. 理论分析

ϵ_1 的微小误差对旋转角造成很大影响的原因,可以从光子晶体的角度来解释.一般的多层膜是由两种折射率不同的介质交替排列组成的,具有周期性结构,可以视为一维光子晶体.而在其中加入磁光介质就相当于在一维光子晶体中引入了缺陷(加入的磁光介质折射率与原有的介质不同),因此多层膜结构的磁光隔离器就可视为一个含有缺陷的一维光子晶体,其带隙中存在缺陷态,使得在缺陷处有很强的光局域性,同时在透射谱的禁带中形成透射峰.如果缺陷为磁光介质,那么就可以产生增强的磁光效

应,并且这种增强只对透射峰对应的特定波长的光有效,如图 2 所示.在保持厚度不变的情况下改变体系中任何一种材料的折射率,都会使透射峰和旋转峰的位置发生偏移.但是这种偏移对于缺陷层的折射率变化非常敏感,对于周期性排列的介质则不敏感^[6].由于我们这里采用的是反射型结构,增加了额外的反射层,使得在整个禁带的范围内都有很高的反射率,所以介质折射率(介电常数)的微小变化对于反射率都没有明显的影响.对于旋转角, SiO_2 和 Ta_2O_5 的折射率的微小变化造成的偏移较小,使工作波长处的旋转角下降不多,但是由于 $\text{Bi}:\text{YIG}$ 为缺陷层,它的折射率很小地变化就可以使旋转峰和透射峰发生较大偏移.

图 2 说明了这种情况:当 ϵ_1 变化了 0.01 时,旋转角的波长响应谱发生了明显的偏移,使得我们选定的工作波长 $1.053\text{ }\mu\text{m}$ 处的旋转角有很大的下降.因此,响应谱的偏移就是 ϵ_1 的变化对旋转角有巨大影响的直接原因.而由于磁光介质层为缺陷层,这种偏移实际上无法避免.在图 2 中可以看到响应谱十分尖锐,并且只有在峰值附近很小的范围内旋转角才能达到或接近 45° ,这样即使响应谱的偏移很小,也会使响应谱的峰值从工作波长处移开,从而使旋

转角下降. 如果可以通过结构上的调整, 使响应谱的带宽增大, 并且使其峰值附近不那么尖锐, 就可以在在一定程度上解决这个问题.

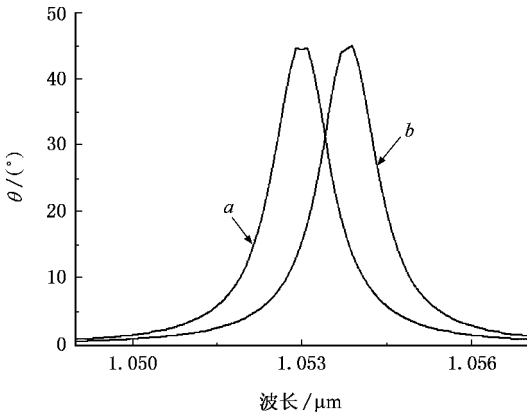


图2 构型1的 ϵ_1 发生变化时旋转谱发生偏移(曲线a的 $\epsilon_1 = 5.87$, 曲线b的 $\epsilon_1 = 5.88$)

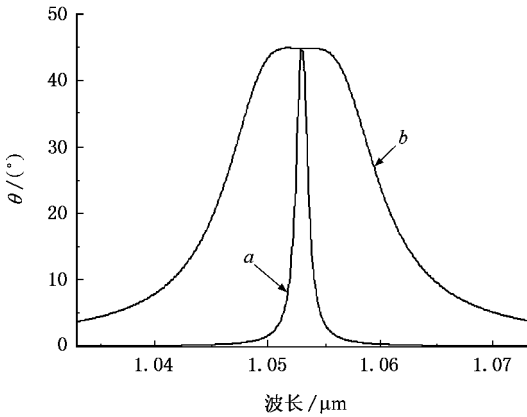


图3 1.053 μm 附近旋转角的响应谱 (a)为构型1的响应谱; (b)为构型2的响应谱

3. 高宽容性的多缺陷磁光多层膜结构

3.1. 多缺陷的磁光多层膜结构

依据光子晶体的理论, 当体系中有多个缺陷时, 如果缺陷在空间上的距离较近, 缺陷模的波函数会发生交叠, 缺陷之间的耦合作用比较强, 电磁波模式的频率间隔较大, 在频谱上各个缺陷对应的峰间隔也较大; 当缺陷在空间上距离较远时, 缺陷之间的相互作用较弱, 缺陷模的频率趋于简并, 频谱上各缺陷对应的峰间隔较小^[17], 并有可能部分重叠. 如果是多个透射峰重叠, 可以形成一个带宽较宽的透射

带^[10], 而如果是旋转角的响应峰, 则也有可能形成带宽很大的新的响应峰.

经过大量结构的计算, 我们发现 $[G_1G_2]^dM_3[G_2G_1]M_2[G_1G_2]^dM_1[G_2G_1]^d$ 这种多缺陷的结构可以实现上面的效果. 其中 G_1 表示普通介质 SiO_2 , G_2 表示 Ta_2O_5 , 介电常数与构型1所采用的相同; M_1, M_2, M_3 表示磁光介质 Ce:YIG , $\epsilon_1 = 4.884$, $\epsilon_2 = 0.0093$. 上角标同样代表此单元重复的周期数. G_1 和 G_2 的厚度仍然为 $1/4$ 个波长, M_1, M_2, M_3 的厚度为半波长的整数倍, 在这里分别为4.5, 6.5和5个波长, 当上角标 a, b, c, d 分别为2, 3, 5, 10, 其中 d 的值较大是因为有一部分介质层充当了反射层(为叙述方便, 我们把这种构型称为构型2), 设计旋转角为 44.71° , 反射率为97.02%. 这种构型的旋转角响应谱如图3所示, 图中曲线a为构型1的旋转角响应谱, 曲线b为构型2的响应谱. 二者在工作波长处的旋转角都十分的接近 45° , 但是可以清楚地看到响应峰b的带宽要远大于a的带宽, 而且响应峰b的顶部在相对较大的范围内十分平坦, 不像a的顶部那样尖锐. 这正是通过多个缺陷的组合达到的效果. 在上面提到的结构参数下, 三个缺陷之间的距离较远, 相互作用较弱, 使它们对应的响应峰相互靠近并且强度接近, 同时由于缺陷之间的作用, 它们对应的响应峰本身就具有较宽的带宽, 这样通过三个响应峰的叠加, 就形成了图3中的响应曲线. 很明显, 当响应谱产生偏移时, 构型2受到的影响将会远小于构型1受到的影响. 在图4中可以看到, 同样是 ϵ_1 变化0.01, 响应谱有了一定的偏移, 还有轻微的畸变, 但是由于构型2的带宽很宽, 1.053 μm 处及附近的旋转角仍能达到 45° , 并且变化趋势缓慢.

3.2. 宽容性分析

由于角标 d 标明的介质层在我们的结构中起到了反射层的作用, 所以可以通过调节 d 值的大小来改变整个结构的反射率, 如果 d 值足够大就可以有足够高的反射率. 通过数值模拟我们发现, 只要 d 值不小于10, 就可以使反射率不小于97%, 并且 d 值增加或减少两到三个周期对于旋转角频谱响应的带宽影响很小. 因此在下面的篇幅中将只对旋转角度进行分析.

下面来比较一下磁光介质的介电张量对角元 ϵ_1 的变化对于构型1和构型2的旋转角的影响. 我们使 ϵ_1 的误差从0开始变化到0.05, 从图4可以看

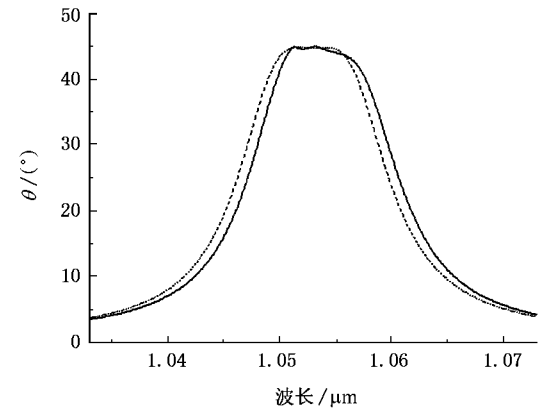


图 4 构型 2 的 ϵ_1 发生变化时旋转谱发生的偏移(虚线为 $\epsilon_1 = 4.884$ 时的响应谱,实线为 $\epsilon_1 = 4.894$ 时的响应谱)

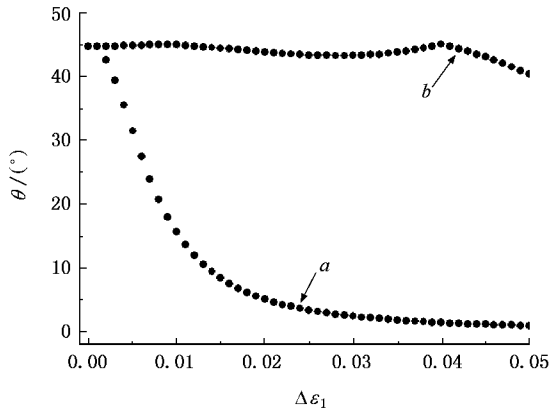


图 5 ϵ_1 的误差对于器件旋转角的影响(曲线 a 代表的是构型 1,曲线 b 代表的是构型 2)

出,当 ϵ_1 的误差达到 0.04 时,构型 2 的旋转角仍能保持在 45° 附近,而构型 1 的旋转角只有在 ϵ_1 的误差小于 0.002 时才能保持在 45° 附近.而且构型 2 采用的是 Ce:YIG ,其介电张量的对角元比 Bi:YIG 要小,相对误差也就更大,说明构型 2 对于 ϵ_1 误差的宽容度要远大于构型 1,有了一个数量级的提高.这就使薄膜的实验制备时对于介电常数要求的精度从非常苛刻降低到可以接受的范围,非常有利于实验的制备.

但是构型 2 在实现了对介电常数的误差有很好的宽容度的同时,对其他参数的宽容度是否会下降?例如由于工艺上的原因,薄膜制备时厚度必然和设计值会有一定的偏差,这种厚度上小的偏差以及入射光非严格的正入射是否会对构型 2 的性能造成很大的影响.为验证这点,我们使构型 2 的每层薄膜的厚度在 $\pm 4 \text{ nm}$ 的微小尺度内随机变化,这种情况重

复 100 次,结果如图 6 所示,在厚度不能按要求制备的情况下,构型 2 的平均旋转角达到了 43.28° ,而且绝大多数旋转角都分布在 40° 以上.与文献 [12] 中单缺陷结构的构型 1 的模拟结果 39.46° 相比有了很大提高.在图 6 中可以看出,计算的结果中约有 10% 左右的旋转角低于 40° ,说明每层薄膜厚度的变化对旋转角仍有一定的影响,但是与文献 [12] 中的接近 40% 的旋转角低于 40° 的结果相比较有了很大改善.另外,我们采用斜入射的传输矩阵法^[12]分析了入射角度对于构型 1 和构型 2 的影响,入射光波长 $1.053 \mu\text{m}$.结果如图 6 所示,可以看到构型 1 正常工作的入射角的范围是 0 到 2° ,而构型 2 则可以在从 0° 到接近 10° 的范围内正常工作,是构型 1 的五倍.

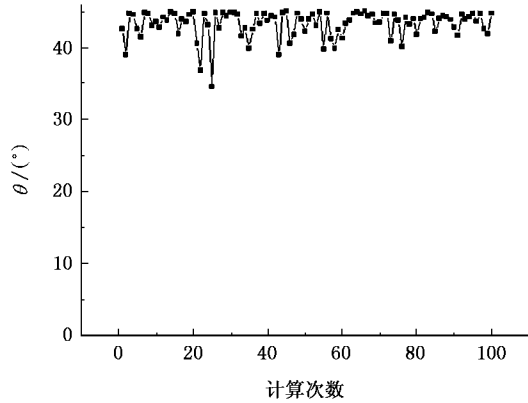


图 6 构型 2 各膜层的厚度以设计厚度为中心,在 $\pm 4 \text{ nm}$ 内随机变化时器件在 $1.053 \mu\text{m}$ 处的旋光角度.计算 100 次

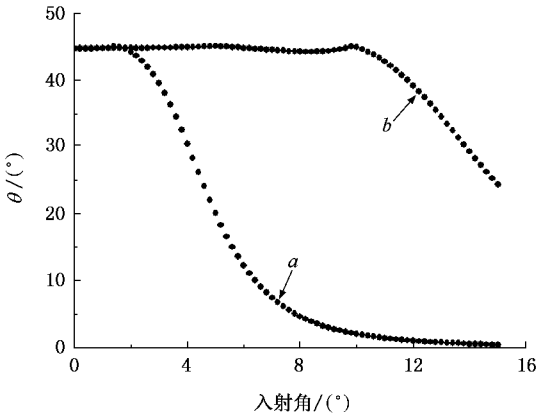


图 7 构型 1(a)和构型 2(b)的旋光角度随入射角的变化

从上面的分析可以看出,我们提出的这种多缺陷结构不仅对于磁光材料层介电常数的误差有很好的宽容性,而且对于每层薄膜厚度的微小变化和入射角的变化也有很好的宽容性.虽然介电常数,膜层

厚度和入射的角度是在实际的制备和使用过程中影响器件性能的三个不同的因素,但是在入射光的波长固定的情况下,这三个因素影响的结果都可以看成使光在每种介质中的光程偏离了设计的 $\lambda/4$ (对于 $G1, G2$)或半波长的整数倍(对于磁光介质 M),进而使响应谱中峰值对应的波长或频率产生偏移.而磁光介质由于是缺陷层,同样大小的参数误差,磁光介质层造成的偏移又要比普通介质大的多,起着决定性地影响.所以介电常数、膜层厚度和入射的角度这三者有着相似的影响,这些影响又主要由磁光介质层来表现.对比图 4 和图 6 中构型 2 的响应曲线就可以发现两条曲线的变化趋势有相似之处.因此只要提高了对于其中一个参数的宽容性,对于其他参数的宽容性也会得到提高.

需要说明的是不仅仅是构型 2 这一种结构具有良好的宽容性,只要是多缺陷的结构,都有可能通过调整缺陷之间的距离和缺陷模的强度,使多个响应峰相互重叠形成图 3 所示的响应曲线,从而具有良好的宽容性.例如当 a, b, c, d 分别为 2, 4, 6, 8 时也具有类似的特性.继续增加缺陷数目会使响应曲线的带宽进一步增加,但整个膜层的厚度会增加.显然,这种结构的膜层厚度较多,会给薄膜的制备带来一些困难,但是新的结构对于薄膜的介电常数的精度要求降低了一个数量级,对于厚度的精度要求也

有一定的降低.因此,总体上新的多缺陷的结构有利于薄膜的实验制备.

4. 结 论

本文分析了材料介电常数的变化对于单缺陷结构的磁光多层膜隔离器性能的影响,发现单缺陷结构对于磁光材料的介电常数的精度要求非常高.提出了一种新的多缺陷的磁光多层膜结构,其旋转角的频谱响应带宽很宽,并且可以在较宽的带宽内使旋转角接近 45° .与单缺陷结构相比,这种结构对于介电常数变化的宽容性得到了一个数量级的提高,大大降低了制备时对于介电常数精度的要求,同时对于膜层厚度地变化和入射角度的宽容性也有较大的提高.由于对各个参数的精度要求降低使得制备更加容易,新的结构有利于薄膜的制备.

但另一方面,本文提出的结构虽然降低了对于制备精度的要求,但是薄膜层数的增加使工艺更加复杂,也使各层薄膜参数的一致性难以控制,进而使成本增加,这是下一步研究时需要考虑的问题.同时本文为了简化问题没有考虑光吸收的影响,但实际上光吸收必然会对隔离器的性能产生影响,这将在进一步研究时考虑.

-
- [1] Inoue M, Fujii T 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 5659
 - [2] Inoue M, Arai K, Fujii T, Abe M 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 6768
 - [3] Inoue M, Arai K, Fujii T, Abe M 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 5768
 - [4] Kato H, Inoue M 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 7017
 - [5] Kato H, Inoue M 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 3906
 - [6] Sakaguchi S, Sugimoto N 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 1087
 - [7] Steel M J, Levy M, Osgood R M Jr 2000 *IEEE Photon Technol. Lett.* **12** 1171
 - [8] Steel M J, Levy M, Osgood R M Jr 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 1289
 - [9] Steel M J, Levy M, Osgood R M Jr. 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 1297
 - [10] Levy M, Yang H C, Steel M J, Fujita J 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 1964
 - [11] Wen X W, Li G J, Qiu G X, Li Y P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3571 (in Chinese) [温晓文、李国俊、仇高新、李永平 2004 物理学报 **53** 3571]
 - [12] Wen X W, Li G J, Qiu G X, Li Y P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1847 (in Chinese) [温晓文、李国俊、仇高新、李永平 2005 物理学报 **54** 1847]
 - [13] Shen Z C, Song Y X, Wang Y J, Fan Z X, Shao J D 2005 *Acta Photonica Sinica* **34** 1526 (in Chinese) [沈自才、宋永香、王英剑、范正修、邵建达 2005 光子学报 **34** 1526]
 - [14] Wu Z Q, Wu B 2001 *The Growth of Thin Film Coatings* (Beijing: Science Press) p170-213 (in Chinese) [吴自勤、吴兵 2001 薄膜生长(北京:科学出版社)第 170—213 页]
 - [15] Shen Z C, Shao J D, Wang Y J, Fan Z X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4842 (in Chinese) [沈自才、邵建达、王英剑、范正修 2005 物理学报 **54** 4842]
 - [16] Du G Q, Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1095 (in Chinese) [杜桂强、刘念华 2004 物理学报 **53** 1095]
 - [17] Qiao F, Zhang C, Wang J 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 3698

Frequency response and tolerance of reflection-mode magneto-optical multi layer film isolator^{*}

Li Guo-Jun¹⁾ Kang Xue-Liang¹⁾ Li Yong-Ping^{1,2)†} Lü Chao³⁾

Fan Zheng-Xiu³⁾ Ding Lei⁴⁾ Sui Zhan⁴⁾

¹⁾ *Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

²⁾ *Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China*

³⁾ *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

⁴⁾ *The Eighth Research Institute, China Academy Of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

(Received 30 May 2006 ; revised manuscript received 25 August 2006)

Abstract

Using the transfer matrix method, we investigated the influence of permittivity error on the properties of magneto-optical multi layer isolator with single-defect, and presented a new type of multi layer structure with multi defect. Compared with single-defect structure, the bandwidth of Faraday rotation frequency response of multi defect structure was increased greatly, and the tolerance of permittivity was increased by one order. Furthermore, the multi defect structure has greater tolerance of film thickness and incidence angle.

Keywords: optical isolator, magneto-optical effect, one-dimensional photonic crystals

PACC: 7820L, 3345, 4210Q, 4283Q

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10376036).

[†] Corresponding author. E-mail: liyp@ustc.edu.cn